

堆積学的手法による筑後川の土砂供給能 に関する長期変遷解析

LONG TERM ANALYSIS ON THE SEDIMENT SUPPLY CHANGE
IN THE CHIKUGOGAWA RIVER BASED ON THE SEDIMENTARY STRUCTURE

横山勝英¹・中村岳由²・五十嵐麻美³

Katsuhide YOKOYAMA, Takayoshi NAKAMURA and Asami IGARASHI

¹正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²学生会員 東京都立大学大学院 土木工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³学生会員 首都大学東京大学院 土木工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

In order to understand the sediment transport systems in the Chikugogawa River and Ariake Bay, the sedimentary structure of the alluvial plain, rate of shoreline advance, and sediment yield in the basin were investigated. Boring data were collected at 69 sites on the plain and river mouth terrace, and the unique sedimentary distribution of sand and clay was analyzed. The annual sedimentation volume of sand for a period of 8,000 years was 600,000 m³. Marine charts from 1923 to 1992 were digitized and changes in the river mouth terrace topography were analyzed. The results indicated that the sedimentation rate decreased in the last 100 years. The distribution of the sediment yield in the river basin was described using equations that relate the sedimentation in the reservoirs with the effective rainfall and local relief. The predicted annual sand yields were 1,030,000 m³. These results show that the sediment yield in the basin and sediment supply to the coastal area have been decreasing in the last 100 years.

Key Words: *sediment supply, reservoir sedimentation, alluvial plain*

1. はじめに

有明海では生態系の変化が社会問題化しているが、問題究明のために求められている情報の一つに陸域からの土砂供給状況がある。土砂は沿岸域の地形・底質を形成し、微細粒子には多量の栄養塩や各種物質が吸着しているため、生態系にとって重要な物質のひとつである。

しかし、有明海への流入河川における土砂関連の研究事例は少なく、橋本ら¹⁾による嘉瀬川流域を対象とした解析、建設省による白川及び筑後川における浮遊砂観測^{2), 3)}などが見受けられる程度であり、河川の供給土砂量と海域環境の関係性を論ずることが困難な状況である。

有明海沿岸の最大河川は筑後川であり、流入水量は全河川合計の45%を占めることから、筑後川が海

域環境に及ぼす影響も非常に高いと考えられる。そこで、本研究では筑後川の土砂供給に関する基礎的な数値を提案することを目的として、筑紫平野の堆積構造解析と河口テラスの前進過程に関する分析、ダム堆砂量に基づく流域土砂生産量の解析を実施し、年平均的な粒径別土砂生産量を検討する。平野構造の解析では過去8,000年間の平均的状況を、河口テラスの分析では過去100年間の状況を、ダム堆砂量解析では過去30年間の状況を把握する。

筑後川の流域図を図-1に示す。筑後川は流域面積が2,860km²、幹川流路延長が143kmの河川である。阿蘇・九重連山に源を発し、本川上流部には治水用の大ダムが設置されている。山地流域の面積は約2,000km²、平野面積は約800km²であり、さらに有明海に面する河口域には140km²にも及ぶ砂泥質の干潟が広がっている。

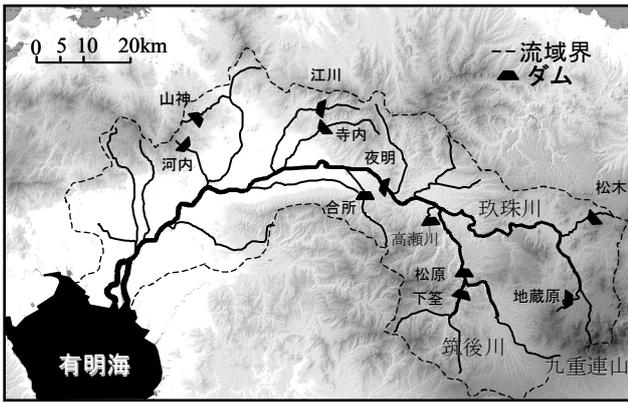


図-1 筑後川流域図

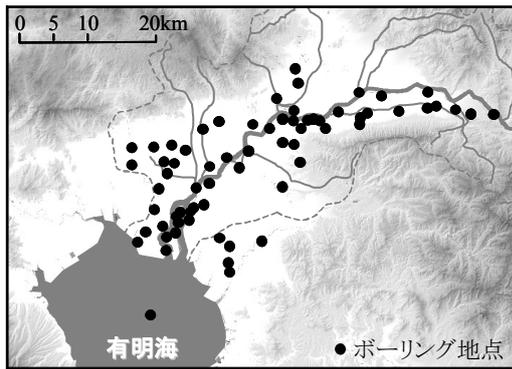


図-2 ボーリング地点図

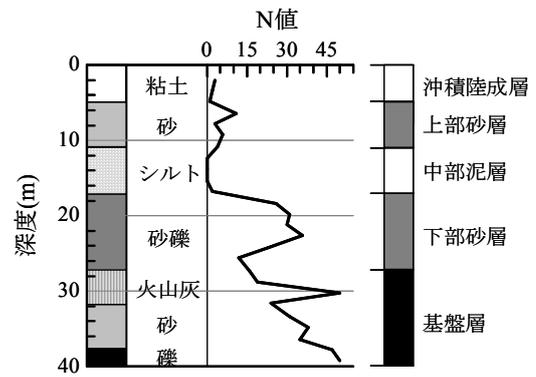


図-3 地質柱状図と土層判別の例

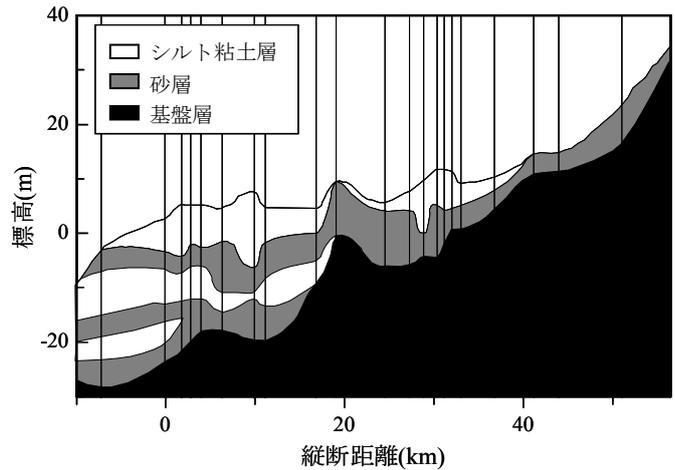


図-4 筑後川筋の地層縦断面図

2. 筑紫平野の堆積構造

筑紫平野は大半が筑後川の沖積作用によって形成された土地である。そのため、平野の堆積構造を解析し、土層（粒径）ごとに土砂のボリュームを計算し、堆積期間で除することで超長期間の平均土砂供給量が求まり、これを流域生産量と考えればよい。

(1) 解析方法

筑紫平野では国道工事や河川堤防工事などに伴って地質調査が実施され、データベース化されて管理されている。そこで全地点のデータをダウンロードし、近接地点ごとにグループ化して、グループごとに平均土質柱状図を作成した。グループ化したボーリング地点は図-2に示す69箇所である。海域に関しては海象観測タワーの建設時の地質調査資料しか入手できなかった。そのため、河口テラスの堆積構造は1地点のみで推定することとした。

海水面変動と沖積作用の関係は次のように説明されている。縄文時代より前には海水面は100m以上低く有明海も存在しなかったが、縄文時代になって海面が上昇しはじめ約8,000年前に有明海が出現した。海進ピーク時期（約6,000年前）には海面が最も高くなり海岸線は現在より10～20km内陸に前進し、筑後

川の河口付近から土砂の堆積が進行して、沖積平野を形成しつつ河口テラスを前進させていった。

この考え方と下山ら⁴⁾が作成した筑紫平野の地質図を参考にして、堆積土層をシルト粘土層、砂層、礫層、火山灰層に大別した。なお、地質図には「シルト混じり砂」や「砂混じり礫」といったように判断に迷う表現も記されているため、N値も判断の参考にした。N値が0～5の場合は沖積粘土層、1～20の場合は沖積砂層、40以上の場合は洪積基盤層と考え、地質表現と照らし合わせながら分類した。

(2) 解析結果

作成した柱状図の一例を図-3に、筑後川筋の地質縦断面図を図-4に示す。礫層と火山灰層は基盤層として、シルト粘土層と砂層は沖積層として取り扱った。礫は縄文海進期以前の河床勾配が急だった時代の河床堆積物であり、また火山灰 (Aso-4) は阿蘇山の噴火によって8.5万年前に堆積した堆積物である。

河口から17km付近までが砂とシルト粘土の互層になっている。最下層は下部砂層と言われ海面上昇時の三角州前縁部であり、その上は中部泥層（有明粘土層）と言われ海進期の内湾堆積物である。その上に上部砂層が乗っており、これは海進ピーク期以降

の三角州性・海浜性の堆積物であり、表層は沖積陸成層と言われ海進ピーク期以降に堆積した河口性湿地の浮泥である⁵⁾。

さらに、17kmで粘土層が途切れて砂面が隆起していることから、17km付近に海面標高が最大であった約6,000年前の河口が存在していたと推測される。40kmから55kmまでの区間は砂層のみである。

以上の整理によって得られた土質柱状図の土層厚に、各地点が代表する面積を乗じて各土層の堆積量を算出したところ、砂は49.0億 m^3 、シルト粘土は43.8億 m^3 と求まった。筑紫平野が形成された沖積期間は8,000年前後であるから、各土層の平均年堆積量は砂では61.2万 m^3 、シルト粘土では54.8万 m^3 となる。

沖積河川では洪水時にウォッシュロード成分が砂に比べて数倍から数十倍多く輸送されるとされており^{6),7)}、平野堆積物も同様の割合になると考えられるが、筑紫平野では砂とシルト粘土の堆積割合は概ね1:1となった。このことは、シルト粘土が河口域以外にも輸送されている可能性を示している。

横山ら⁸⁾は干潟底泥の分布特性と一般に言われる反時計回りの環流の存在との関連性から、筑後川から流出したシルト粘土が北部湾奥に移流・堆積するメカニズムが存在するとしている。実際、湾奥に面する白石平野は縄文海進期以降の堆積層が全て有明粘土である⁴⁾。本研究の解析もこれらの現象を支持する結果となった。

また、筑後川流域のシルト粘土生産量を求めるためには、湾奥部の平野や干潟の堆積構造も解析することが必要であることが分かった。

3. 河口テラスの前進過程

筑後川河口域では100年に1kmの速度で海岸線が前進するほど土砂供給が盛んであると言われている。そこで、明治時代からの海図を用いて、過去100年間における河口テラスの前進状況について検討を行う。

まず、横山ら⁸⁾によって2003年に調査された現状の地形底質を図-5に示す。筑後川と支川早津江川の河口前面に幅10km程度、岸沖距離10km程度の河口テラスが広がっており、筑後川の土砂供給作用によってテラスが前進したことがうかがえる。そこで、図示した領域を解析範囲として設定する。

入手可能な海図の一覧を表-1に示す。初版は1907年に発行され、約20年ごとに改訂されている。以後、測量年で海図を呼称することとする。このうち、初版は陸上の鉄道や海岸線、海溝や海嶺の緯度経度座標が明らかに後年と一致しないため測定の精度が低いものとして検討から除外し、1969年は水深の記載がまばらであったため干潟地形の解析は不可能と判

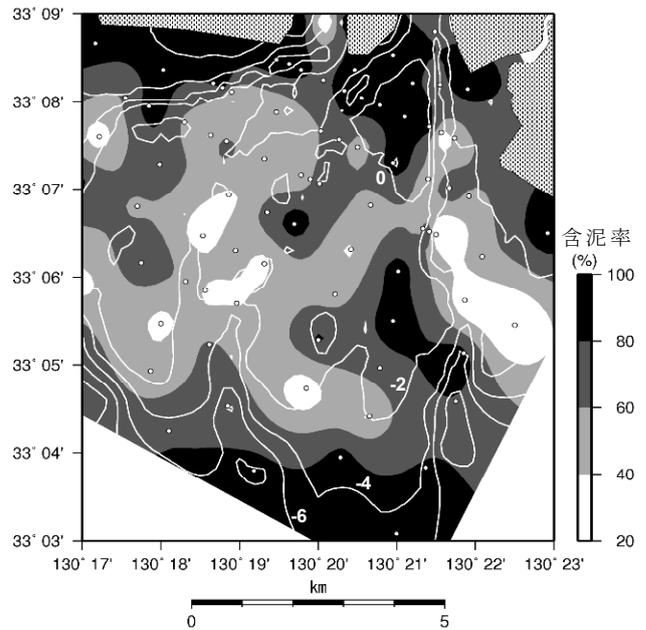


図-5 河口テラスの表層底質分布(含泥率)

表-1 入手可能な海図の一覧

刊行年月日	測量年	縮尺	使用
明治40年	明治18~36年 (1885~1903年)	1/10万	×
昭和4年	大正12年(1923年)	1/10万	○
昭和29年	昭和26年(1951年)	1/3.5万	○
昭和47年	昭和44年(1969年)	1/10万	×
平成13年	平成4年(1992年)	1/3.5万	○
平成13年	平成5年(1991年)	1/10万	×

断した。

したがって1923年、1951年、1992年の3つの海図を対象とした。水深の基準面はT.P.-2.7m(三池港)であるため、干潮時に干出するT.P.-2.7mから0mまでの干潟領域の変化は解析できない。

図-6に等水深線の経年比較を示す。-2.7mラインはテラスの先端において1923年から51年にかけて最大で1kmほど後退し、それ以降は顕著な変化が見られない。一方、-5.7mラインは西側の先端部分は経年的に前進、東側の先端部分は23年から51年にかけて前進し、それ以降は停止している。

体積変化量は図-7のようになり、T.P.-4mを境にして侵食堆積の傾向が異なっていた。表層底質分布図(図-5)を参考にすると、-1mから-4mまでの干潟部は砂質であり、1951以前に328万 m^3 の侵食、51年以降は181万 m^3 の堆積である。-4mより深いテラス縁辺部では含泥率が60~100%のシルト粘土領域であり、1951以前に825万 m^3 の堆積、それ以降は35万 m^3 の侵食である。

全領域の平均変化量としてみると、1951年以前では年間18万m³の堆積、51年以降は年間5万m³の堆積となり、土砂供給量が減少している様子が見えてくる。T.P.-2.7mよりも上部の干潟領域については海図による解析が不可能であるため、河口テラス全体の変動傾向を定量的に示すことは出来ないが、1951年(昭和26年)以降は筑後川から海域への土砂供給量が減少している可能性があることが分かった。

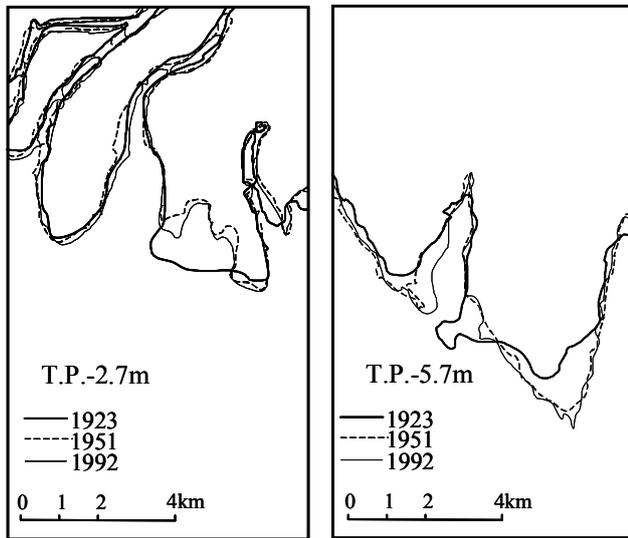


図-6 河口テラス前面の経年変化

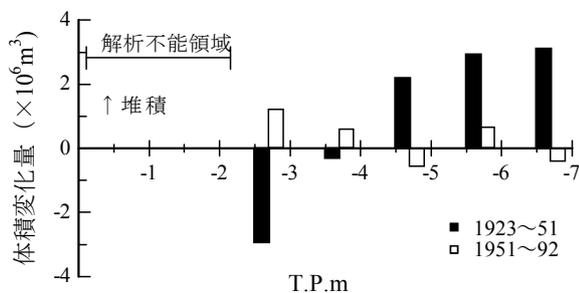


図-7 水深別堆積・侵食量

4. 流域土砂生産量の推定

筑後川流域には11基の貯水ダムが設置されているため、堆砂データを用いて過去30年間の土砂生産量を調べ、ダム流域以外の自然流域については簡易的な土砂生産モデルによって土砂生産量を推定する。

(1) ダムへの流入土砂量

筑後川流域に設置された11ダムについて、表-2に貯水量と堆砂量、捕捉率、地質などについて整理した。捕捉率は吉良式⁹⁾で求めた。

捕捉率が極端に低く堆砂が停止しているダムでは、堆砂量から流域の土砂生産状況を推定することは不可能である。そこで、表-2に○印で示す6つのダムを以下の検討に用いることとする。昭和45年から30年間の6ダムの合計堆砂量は794万m³であった。

次に堆砂量の粒径別内訳を求める。6ダムのうち松原・下笠ダムでは堆砂のボーリング調査が実施されており^{10),11)}、松原ダムの堆積構造は図-8のようであった。砂礫は貯水池流入部に堆積しており、シルト粘土が堤体付近に堆積している。そのため、砂礫は流入量の全量が捕捉され、シルト粘土は一部が放流されている可能性がある。

洪水時のSSデータ(平成11年度松原ダム調査)からSS流入量と放流量を計算すると捕捉率が80%となり、吉良式の捕捉率と等しかった。また、観測された土砂の粒径は0.1mm以下のシルト粘土であった。つまり、流入土砂のうちシルト粘土は吉良式で求めた捕捉率の分だけ堆積していると考えられる。

そこで、各土層の体積を粒径別の捕捉率で除して流入土砂量を求めると、表-3が得られた。これより、松原ダムと下笠ダムでは地質状態が異なるにもかかわらず、堆砂の粒径構成は同程度の比率となった。

(2) 流域の土砂生産量

前節で得られた土砂流入量をダム流域における土

表-2 堆砂傾向(1999年時点)

	貯水容量 (千m ³)	堆砂量 (千m ³)	経過年	比堆砂量 (m ³ /km ² /年)	捕捉率 (%)	流域地質	検討ダム
下笠	59,300	3,375	30	608	80	第三紀安山岩	○
松原	54,600	3,501	29	395	80	第四紀溶結凝灰岩	○
地藏原	1,858	422	78	平衡	89	第三紀安山岩, 第四紀溶結凝灰岩	×
松木	1,300	208	23	経過不明	75	第三紀安山岩, 第四紀溶結凝灰岩	×
高瀬川	273	30	26	34	32	第三紀安山岩	×
夜明	4,050	68	46	平衡	13	—	×
江川	25,300	394	27	486	94	変成岩	○
寺内	18,000	461	22	411	91	変成岩	○
山神	2,980	65	19	375	88	中生代 花崗岩	○
合所	7,660	146	11	316	85	第三紀安山岩	○
河内	1,196	40	29	平衡	87	中生代 花崗岩	×

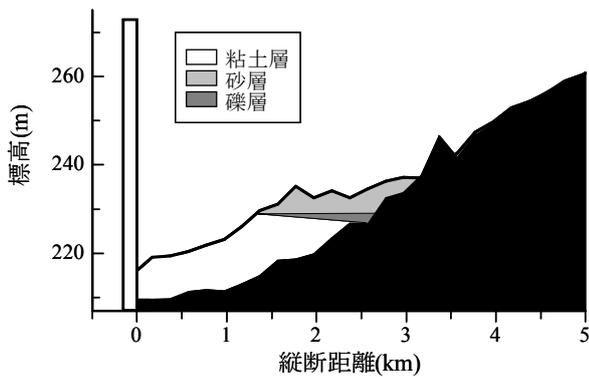


図-8 松原ダムの堆積構造

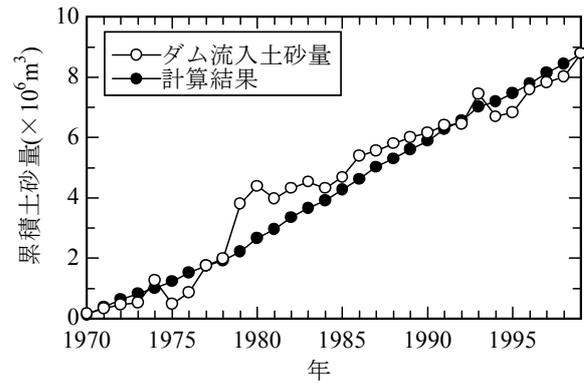


図-9 累積ダム流入土砂量

表-3 粒径別の流入土砂量

	全土量 10 ³ m ³	シルト	砂	礫
		0.1mm以下	1mm以下	1mm以上
松原ダム	4,101	2,853	975	273
		69.6%	23.8%	6.7%
下笠ダム	3,722	2,671	911	140
		71.8%	24.5%	3.8%

砂生産量と考えると、これを土砂生産モデルで表現する。土砂生産モデルは次式のとおりであり、単位格子における比土砂生産量 (Q_s) は起伏量 (H) と降雨 (r) のべき乗で表されるとした。

$$Q_s = \sum_{k=1}^n \alpha H^\beta r^\gamma \quad (1)$$

ここで、 $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ は係数であり、 n は30年間の日数である。起伏量は4km格子における標高差である。降雨は流域内の47雨量観測所における有効降雨を用い、これを内挿補完して各格子に与えた。なお、地質・植生については比堆砂量との相関が明確でなかったため、パラメーターには組み込まないこととした。

このモデルにより6ダム流域について完成年以降の日単位計算を行い、それぞれの土砂生産量との絶対誤差の和が最小になるように係数を決定した。その結果、起伏量係数 β が0.86、降雨係数 γ が0.46の場合に誤差が最小になり、累積土砂量の時系列として図-9が得られた。1979年の急激な増加は十分に表現されていないものの、全体としては良好な再現結果となった。また、 β と γ の値より、筑後川流域では土砂生産の主要因は起伏量であり、副要因として有効降雨が寄与していることが分かった。

この簡易モデルを用いて流域全体の土砂生産量を計算すると図-10のようになった。筑後川本川の源流付近で比土砂生産量が982m³/km²/年と最大の値を取り、玖珠川流域はなだらかな地形であるために250～500m³/km²/年の範囲、玖珠川源流の九重連山で

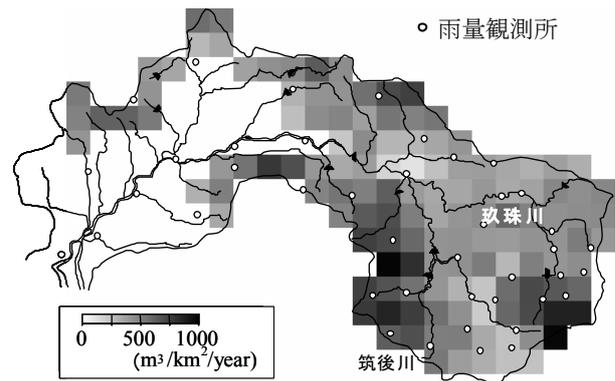


図-10 筑後川流域の土砂生産量分布

表-4 筑後川流域の土砂生産量(単位:千m³)

	累積土砂量 30年間	年平均生産土砂量			合計
		シルト	砂	礫	
ダム流域	10,025	237	80	17	334
自然流域	21,000	497	168	35	700
流域合計	31,026	734	248	52	1,034

は700～900m³/km²/年の範囲となった。

これらの土砂生産量を松原・下笠ダムの堆砂データを参考にして粒径別に分ける。松原・下笠ダム流域における比土砂生産量は209～982m³/km²/年の範囲にあり、2つのダムの粒径割合はほぼ等しかった。その他の流域は比土砂生産量が118～976m³/km²/年の範囲にあって松原・下笠ダムと同程度であること、植生もほとんど森林であること、地質と比堆砂量の間には明確な相関が見られないことなどから、粒径割合も松原・下笠ダムと同程度であると仮定する。

表-3の平均粒径割合を全体に適用して土砂生産量を求めると表-4が得られた。流域全体の平均年生産量は103.4万m³となり、このうち砂は24.8万m³である。さらに、ダム流域で生産される砂(8.0万m³)は堆砂として捕捉され、自然流域における16.8万m³が河道に流入していることとなった。

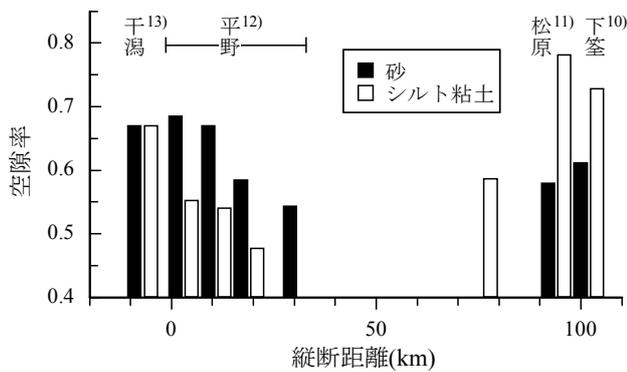


図-11 各領域の堆積土砂の空隙率

表-5 年平均の生産・堆積土砂量(単位:千 m^3)

	空隙込み土砂量		実質土砂量	
	シルト	砂	シルト	砂
過去8,000年	548	612	292	277
ダム流域	237	80	58	32
最近30年 自然流域	497	168	121	68
合計	734	248	179	100

5. 実質体積による土砂量の比較

これまでの検討は空隙込みの堆積土量で行ってきたが、各領域で土砂の圧密度合いが異なるため、土量の正確な比較にはなっていない。そこで、各領域における土質試験データに基づいて空隙を除いた実質体積を求めた。

図-11に干潟、平野、ダムにおける堆積土砂の空隙率を示す。干潟では空隙率が砂、シルト粘土ともに約0.67であるが、平野の上流部ほど締め固まってゆく。また、貯水池では圧密時間が30年と短いため、シルト粘土の空隙率が著しく高い。これらの空隙率を用いて各領域で実質体積を計算し、年平均値として取りまとめると表-5が得られた。なお、自然流域の土砂量はダム堆砂から推定しているのので、実質体積への変換にも堆砂の空隙率を用いた。

これより、最近の土砂生産量は近代以前と比べて砂は36%に減少していることが分かった。さらに最近では生産される砂のうち32%がダムによって堰き止められているため、河道に流出する砂の量は近代以前の25%に過ぎない。シルト粘土の減少率は61%となったが、有明海湾奥部への流出分を解析すればさらに低い値になると考えられる。

6. まとめ

本研究では筑紫平野の堆積構造、河口テラスの前進速度と山地流域における土砂生産量を解析して、

8,000年間の平均土砂生産・供給量、100年間の土砂供給状況の推移、30年間の平均土砂生産量を算出した。近代以前と最近30年間を比較すると、砂の生産量は36%に減少し、さらにダムの土砂堰き止めの影響によって河道への流出量は25%に減少していると推定された。また、1951年以降は干潟の前進速度が低下していることから、海域への土砂供給量も減少していると推察された。

解析手法が異なるものを比較しているため、土砂生産・供給量の減少を断定するのは早急である。しかし、流域では明治以降、植林が進められて荒地が減少し、河川では河床低下により緩勾配化が進んだ。これらの事実は土砂生産量や河道流砂量が減少していることを示唆しており、本研究の解析結果を裏付けるものと考えられる。そのため、今後は近代における流砂環境の変化を正確に把握することが課題である。

謝辞:資料収集にあたっては国土交通省筑後川河川事務所調査課にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 橋本晴行, 渡辺勝利, 全炳徳, 上野賢仁, 山中稔, 笠井美青, 野上昭治, 緒方勤: リモートセンシングを用いた嘉瀬川ダム流域の被覆状況調査と流出土砂量の推定, 水工学論文集第45巻, pp. 805-810, 2001.
- 2) 末次忠司, 藤田光一, 諏訪義雄, 横山勝英: 沖積河川の河口域における土砂動態と地形・底質変化に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料32, 2002.
- 3) 建設省河川局: 河川砂防技術基準(案)調査編, 山海堂, 東京, 1976.
- 4) 下山正一, 松本直久, 湯村弘志, 竹村恵二, 岩尾雄四郎, 三浦哲彦, 陶野郁雄: 有明海北岸低地の第四系, 九州大学理学部研究報告18巻, pp. 103-129, 1994.
- 5) 海津正倫: 沖積低地の古環境学, 古今書院, 1994.
- 6) 清水康行, 嵯峨浩, 早川博, 品川守: 石狩川の土砂流出に関する研究, 水工学論文集第42巻, pp. 1039-1044, 1998.
- 7) 土木研究所河川研究室: 澗沼川洪水観測レポート(2)1990~2000, 土木研究所資料3798, 2001.
- 8) 横山勝英, 河野史郎, 山本浩一: 有明海湾奥部の地形・底質分布に関する現地調査, 海岸工学論文集52巻, pp. 936-940, 2005.
- 9) 吉良八郎: ダムの堆砂とその防除, 森北出版, 1982.
- 10) 筑後川ダム統合管理事務所: 下笠ダム堆砂土質調査業務報告書, 2000.
- 11) 筑後川ダム統合管理事務所: 松原ダム堆砂土質調査業務報告書, 2000.
- 12) 筑後川河川事務所: 大刀洗水門外2件地質調査業務報告書, 2001.
- 13) 有明海研究グループ: 有明・不知火海域の第四系, 地学団体研究会, 1965.

(2005. 9. 30 受付)